

不同水力负荷对两种生态沟渠内沉水植物苦草净化效果的影响研究

蔡敏, 崔娜欣, 张旭, 陈桂发, 周丽, 邹国燕

引用本文:

蔡敏, 崔娜欣, 张旭, 陈桂发, 周丽, 邹国燕. 不同水力负荷对两种生态沟渠内沉水植物苦草净化效果的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(7): 1621-1631.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-1112>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较

冯优, 陈庆锋, 李金业, 郭贝贝, 刘婷, 李磊

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2397-2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0816>

不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究

叶磊, 李希, 田日昌, 吴凤平, 孟岑, 夏梦华, 郭宁宁, 凡翔, 李裕元, 王辉

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2409-2419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0761>

氮负荷升高对苦草(*Vallisneria natans*)和穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)生长的影响

李启升, 胡忠军, 李永吉, 何虎, 韩燕青, 靳辉, 李宽意

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1589-1596 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1599>

绿狐尾藻生态沟渠在低温状态下对磷的去除

常小云, 张树楠, 张苗苗, 肖博仁, 陈均利

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 852-858 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1196>

洱海海西不同种植类型下农灌沟渠雨季水质变化特征与综合评价

谢坤, 罗元, 冯弋洋, 何秋平, 张克强, 沈仕洲, 王凤

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2387-2396 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0741>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蔡敏, 崔娜欣, 张旭, 等. 不同水力负荷对两种生态沟渠内沉水植物苦草净化效果的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(7): 1621-1631.

CAI M, CUI N X, ZHANG X, et al. Influence of different hydraulic load rates on the purification performance of submerged macrophyte *Vallisneria natans* in two vegetated drainage ditch types[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(7): 1621-1631.



开放科学 OSID

不同水力负荷对两种生态沟渠内沉水植物苦草净化效果的影响研究

蔡敏^{1,2}, 崔娜欣^{1,2*}, 张旭^{1,2}, 陈桂发^{1,2}, 周丽^{1,2}, 邹国燕^{1,2}

(1. 上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403; 2. 上海低碳农业工程技术研究中心, 上海 201415)

摘要: 利用农业灌排系统改造建设生态沟渠是治理农田面源污染的重要技术措施, 水生植物、填料及水力负荷等是影响沟渠净化效率的重要因素。本研究以沉水植物苦草(*Vallisneria natans*)沟渠和沸石+苦草沟渠为研究对象, 分析了不同水力负荷(HLR)下两种沟渠对农田径流中氮磷污染物的净化效果差异, 阐明了苦草对沟渠脱氮除磷的贡献及其主要影响因素。结果表明, 不同HLR下沟渠对水体氮和磷浓度去除率分别为47.7%~66.0%和57.5%~77.1%, 随HLR升高而降低; 氮和磷单位面积去除率为305.3~1 009.2 mg·m⁻²·d⁻¹和17.8~66.7 mg·m⁻²·d⁻¹, 随HLR升高而升高。HLR显著影响沟渠氮、磷净化效率($P<0.05$), 而沸石填料则影响较小($P>0.05$)。与沟渠运行前相比, 苦草的密度、叶长以及总生物量(干质量)分别增加5.9~7.0、1.8~2.3倍和4.0~5.0倍, 低HLR下苦草生长更好。苦草叶片及根系的氮、磷和叶绿素含量与水体氮磷含量显著正相关($P<0.05$)。苦草直接吸收去除氮和磷量分别为2 674.4~3 384.1 mg·m⁻²和579.6~673.9 mg·m⁻², 对沟渠氮和磷去除的贡献分别为5.6%~19.9%和20.1%~65.0%, 苦草吸收贡献率随HLR升高而降低, HLR是影响苦草直接吸收对沟渠氮、磷去除贡献的主要因素。综上, 苦草沟渠可有效削减农田氮、磷流失, 提高HLR虽然降低氮、磷浓度去除率, 但能显著增加氮、磷截留量。沸石+苦草沟渠长期运行后, 应及时更新沸石以保障沟渠内填料强化净化功能的发挥。因此, 从浓度和通量两方面对生态沟渠净化效果进行综合评价对于优化沟渠设计和运行管理具有重要实践意义。

关键词: 农田径流; 生态沟渠; 沉水植物; 填料; 水力负荷

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)07-1621-11 doi:10.11654/jaes.2023-1112

Influence of different hydraulic load rates on the purification performance of submerged macrophyte *Vallisneria natans* in two vegetated drainage ditch types

CAI Min^{1,2}, CUI Naxin^{1,2*}, ZHANG Xu^{1,2}, CHEN Guifa^{1,2}, ZHOU Li^{1,2}, ZOU Guoyan^{1,2}

(1. Eco-environmental Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Science, Shanghai 201403, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Low-carbon Agriculture(SERCLA), Shanghai 201415, China)

Abstract: Vegetated drainage ditches (VDD) originate from agricultural irrigation and drainage system, representing an important technology to effectively control the non-point source pollution in farmlands. Aquatic plants, substrates, and hydraulic loading rate (HLR) are important VDD purification efficiency-affecting factors. In this study, we investigated the nitrogen (N) and phosphorus (P) removal efficiencies in farmland runoff under different HLR levels in two VDD types, i.e., drainage ditch planted with a submersed macrophyte

收稿日期: 2023-12-29 录用日期: 2024-03-29

作者简介: 蔡敏(1991—), 男, 上海人, 助理研究员, 主要从事水环境治理研究。E-mail: caiminjay@foxmail.com

*通信作者: 崔娜欣 E-mail: 86176241@qq.com

基金项目: 上海市 2022 年度“科技创新行动计划”国内科技合作项目(22015821200); 国家重点研发计划项目(2021YFC3201503-02); 长江生态环境保护修复联合研究二期项目(2022-LHYJ-02-0304); 上海市农业科学院卓越团队建设计划项目(沪农科卓 2022-023)

Project supported: National S&T Cooperation Program of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (22015821200); National Key Research and Development Program of China(2021YFC3201503-02); Yangtze River Joint Research Phase II Program (2022-LHYJ-02-0304); Excellent Team Building Project of Shanghai Academy of Agricultural Sciences(2022-023)

(*Vallisneria natans*) (VDD) and that planted similarly with additional zeolite supplementation (ZVDD). We successfully elucidated how plant N and P uptake contributed to the corresponding N and P removal in VDD along with the main impacting factors. Our results indicated that the TN and TP concentration removal efficiency in the VDDs under different HLRs were 47.7%–66.0% and 57.5%–77.1%, respectively, which decreased with increasing HLRs. However, the areal TN and TP removal efficiencies in the VDDs varied between 305.3–1 009.2 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ and 7.8–66.7 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively, which increased with elevated HLRs. The HLR, rather than zeolite addition, significantly affected VDD N and P removal efficiencies ($P < 0.05$). Compared with the plants at the beginning of the experiment, plant density, leaf length, and total biomass dry weight yielded a 5.9–7.0, 1.8–2.3, and 4.0–5.0 fold increase, respectively. Moreover, we observed that *V. natans* grew better at low HLR. N, P, and chlorophyll concentrations in the *V. natans* leaves and roots significantly positively correlated with the VDD N and P content ($P < 0.05$). The N and P amounts directly assimilated by *V. natans* were 2 674.4–3 384.1 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ and 579.6–673.9 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. The contribution of plant uptake to N and P removal was 5.6%–19.9% and 20.1%–65.0%, respectively, which decreased with increasing HLR. Our results indicated that HLR was the main factor affecting the contribution of plant uptake of *V. natans* to N and P removal in VDDs. Taken together, the drainage ditch planted with *V. natans* could be successfully applied to mitigate N and P runoff from farmlands. Although improving HDR reduced the N and P removal rates, it could significantly increase the N and P retention amounts. After long-term ZVDD operation, zeolite should be replaced in time to ensure enhanced purification performance. Notably, optimizing design, operation, and maintenance by comprehensively assessing VDD purification performance in terms of both pollutant concentration and flux removal is of particular practical significance.

Keywords: farmland runoff; ecological drainage ditch; submersed macrophyte; substrate; hydraulic loading rate

农业种植过程中施用的大量化肥、农药等往往不能被植物完全吸收利用,导致随降雨或人为排水产生的农田径流中携带高负荷的氮、磷等污染物进入周围水体,加剧水体富营养化、有害藻华爆发以及水体生态退化,成为水体污染的主要驱动因素^[1-2]。自农业灌溉系统的农田排水沟建设发展以来,生态沟渠是农田径流进入地表水体的主要通道,功能上类似于表流湿地或河流生态系统,可以通过底质吸附、植物吸收以及微生物降解等物理-化学-生物联合作用去除水体中氮、磷等污染物,是农业面源污染防治的关键技术之一^[3-4]。因此,如何提高生态沟渠运行效果是农业面源污染治理领域的研究热点。

作为生态沟渠的主要组成部分,沉水植物是沟渠常用水生植物类型之一,可以直接吸收水体中的氮磷等污染物将其去除,同时其叶片或根系表面能为微生物生长提供适宜微生境,间接促进水体污染物的微生物降解^[5]。沉水植物还可以有效降低水流速度,增加水力停留时间,促进悬浮颗粒的沉淀或防止其再悬浮,进而为生态沟渠截留净化污染物提供适宜条件^[6-7]。植物通过吸收水体氮、磷等污染物并将其储存在植物体内是水体氮、磷去除的重要机制之一,然而水力负荷、营养盐含量等运行条件如何影响沟渠内沉水植物的生长及其对污染物的去除机制仍不清楚,尤其是沉水植物的直接吸收作用对沟渠脱氮除磷的贡献如何仍需深入研究^[8]。

另外,由于我国土地资源紧缺,在不增加沟渠建

设规模、避免占用额外土地的前提下,在沟渠内间隔设置功能性基质填料,利用填料吸附作用截留氮、磷等污染物,并为微生物生长提供载体环境,是进一步提高生态沟渠净化效率的有效方式^[9-10]。然而,由于填料存在吸附饱和的问题,沟渠运行一定周期后填料强化功能如何仍需进一步验证。

苦草(*Vallisneria natans*)为常绿沉水植物,水质净化效果好、易管理,已被广泛应用于生态沟渠建设^[7,10]。因此,本文以苦草沟渠(VDD)和填料苦草沟渠(ZVDD)为研究对象,通过分析不同水力负荷下的两种沟渠净化效果差异,探究水力负荷差异对两种沟渠内沉水植物生长和吸收去除氮、磷的影响,查明沉水植物吸收对沟渠氮、磷去除的贡献及其影响因素,为进一步利用生态沟渠有效控制农田面源污染提供理论依据与技术参数。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

实验在上海市农业科学院下属庄行试验站(30° 53' 24N, 121° 23' 15E)的中试规模生态沟渠内开展,实验区域气候为亚热带海洋性季风气候,10 a平均气温为16.1 °C,降水量为1 191.5 mm。

1.2 实验设计

选择研究区内的6条生态沟渠开展实验,沟渠深1.30 m、长30.00 m,横截面为上底宽1.05 m、下底宽0.40 m的倒梯形,沟渠侧壁为预留种植孔预制板,孔

内种植狗牙根 [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.]。其中3条为苦草沟渠;另外3条为沸石+苦草沟渠,即每隔5 m在沟底设置了粒径为4~6 cm的沸石填料,沸石装填于尼龙网袋后置于沟底,厚度为0.40 m、长度为1.00 m,与沟渠内壁同宽,为2013年填入(图1)。在沟渠内按50株·m⁻²密度种植沉水植物苦草,采用附近河道水浇灌培育1个月,待苦草成活、群落建成后开始正式实验。根据实验区农田排水中氮、磷浓度,在40 m³的配水池内,用附近池塘水添加NH₄Cl和KH₂PO₄配制进水,进水中TN、氨氮、硝态氮和TP浓度分别为2.32~5.35、1.18~2.50、0.64~1.70 mg·L⁻¹和0.09~0.26 mg·L⁻¹。实验期间,每条沟渠内保持水深0.70 m、水量为11.76 m³。依据前期实验结果^[7,10],综合考虑进水水质特征、净化效率、沟渠规格等,采用流量阀控制、设置29.20、14.60 m³·m⁻²·d⁻¹和7.30 m³·m⁻²·d⁻¹3种水力负荷(HLR),随机对应两种类型沟渠的3条沟渠,共形成6个处理:高、中、低水力负荷下的苦草沟渠(VDD-H, VDD-M, VDD-L)和沸石+苦草沟渠(ZVDD-H, ZVDD-M, ZVDD-L)。于2019年6月20日正式启动动态进水实验,实验持续53 d。

1.3 样品采集与分析

实验期间,每6~7 d上午9:00—10:00利用塑料水样瓶在沟渠进、出水口处采集水样,送至实验室进行水质分析。同时,采用便携式水质测定仪 HI9829

(HANNA,意大利)原位测定水体温度、pH、溶解氧(DO)和电导率(EC)等指标。采用流式注射自动分析仪(Seal, AA3,德国)测定水体氨氮、硝态氮浓度。采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法(GB11894—1989)测定水体总氮(TN)含量,采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法(GB 11893—1989)测定水体总磷(TP)含量。

实验运行前后,采集进水区和出水区植物样品。每个区域随机采集3个植物样方(25 cm×25 cm)。带根系采集整株植物,用自来水清洗干净底泥等杂物,计数植物株数。测量植物叶长、根长及地上、地下部分湿质量。将植物在烘箱内105℃杀青后,在80℃烘干至质量恒定,测定植物地上、地下干质量。植物样品研磨过筛后,采用元素分析仪测定植物TN含量,采用H₂SO₄-H₂O₂消煮后,钼锑抗分光光度法测定植物TP含量^[11]。随机采集进水区和出水区苦草新生完全展开叶片,用自来水冲洗干净后,再用超纯水冲洗3次、用滤纸将叶片表面水分擦干,采用95%乙醇提取法测定叶片叶绿素含量^[12]。

1.4 数据统计分析

目前通常采用沿沟渠水流方向的氮、磷浓度差对沟渠拦截净化效率进行评价。但是也有研究认为,采用通量表征污染量,通过污染物浓度与流量的乘积,表征通过某一横截面积的污染量,兼顾浓度及水

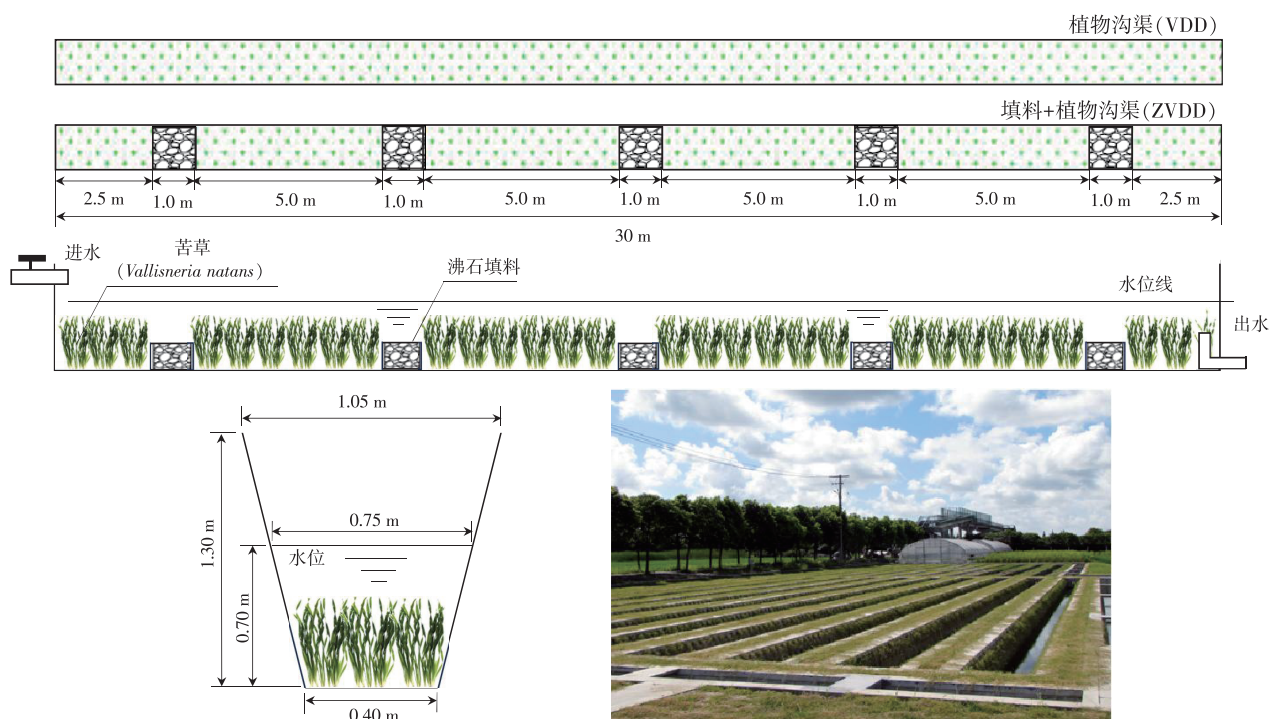


图1 植物沟渠结构及实验现场照片

Figure 1 Schematic diagram of vegetated drainage ditch and a photo of experiment field

体流量等特征的变化,对于流速时空差异较大的沟渠更为合理^[13]。但是,目前关于生态沟渠净化效率的研究多以浓度差异评价为主,结合通量的单位面积净化效率报道较少,难以综合评价生态沟渠实际运行效果。因此,本研究采用浓度和通量两种方法综合评价不同处理下沟渠净化效率,两种评价方法计算公式分别如下:

(1)以氮、磷浓度差计算浓度去除率(RR)计算公式为:

$$RR = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_i 和 C_e 为进出水中氮、磷质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(2)氮、磷单位面积去除率(AR , $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)计算公式为:

$$AR = \frac{C_i - C_e}{A} \times Flow \times 10^3 \quad (2)$$

式中: $Flow$ 为流量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; A 为沟渠面积, m^2 。

根据运行前后进、出水区植物生物量,氮、磷含量等计算评估植物吸收对沟渠脱氮除磷的贡献(PC),计算公式如下:

$$PC = Q_p / Q \times 100\% \quad (3)$$

$$Q = AR \times T \quad (4)$$

$$Q_p = B_i \times C_{pi} - B_o \times C_{po} \quad (5)$$

式中: Q 为沟渠氮、磷去除量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; AR 为氮、磷单位面积去除率, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; T 为运行天数, d ; Q_p 为植物吸收氮、磷量(进、出水区平均值), $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; B_i 和 B_o 分别为沟渠运行前后苦草生物量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; C_{pi} 和 C_{po} 分别为沟渠运行前后苦草氮、磷含量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

所有实验数据均采用SPSS 19.0软件进行统计分析。采用单因素方差分析、双因素方差分析和Tukey多重比较分析结果的显著性,采用Pearson双尾检验分析指标间的相关性,采用 $P < 0.05$ 代表统计学显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 不同沟渠对农田径流中氮、磷净化效果

2.1.1 不同沟渠内水体理化性质差异

由表1可知,实验期间,进水区pH值范围为7.64~7.74,各沟渠出水pH普遍升高,并且总体上表现为未添加沸石沟渠高于有沸石沟渠,尤其是在中低HLR下出现显著差异($P < 0.05$)。同样地,水体DO含量在进水区为 $5.21 \sim 5.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水区则显著升高至 $5.58 \sim 7.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,也表现为未添加沸石沟渠出水DO高于有沸石沟渠,并且在中低HLR下出现显著差异($P < 0.05$)。水体中游离的 CO_2 和碳酸盐含量变化在一定程度上会改变水体的pH值,沟渠内苦草通过光合作用消耗水体 CO_2 并释放氧气导致水体DO和pH升高^[14-15],而VDD中较多的苦草量可能是导致其pH和DO高于ZVDD的主要原因。进水EC值平均为 $550 \sim 568 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,出水EC值总体低于进水,并且呈现随HLR升高而增加的趋势,另外未添加沸石沟渠EC值更低,尤其是在中低HLR下VDD-L和VDD-M中的EC值分别为 $508 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $501 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,而添加沸石的ZVDD-L和ZVDD-M则分别达 $532 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $540 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,这一结果与Kumwimba等^[16]报道的沟渠水体EC值为 $255 \sim 1320 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 一致。沉水植物的拦截净化以及颗粒物沉降吸附等作用可能是导致水体EC值下降的主要原因,另外,高HLR下水流较快,影响沉降吸附,导致EC值相对较高。

2.1.2 不同生态沟渠对水体氮、磷净化效果差异

图2为实验期间不同沟渠进、出水氮、磷浓度。除前3次部分各沟渠出水平均TN浓度高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)V类标准 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外,随着沟渠内苦草生长,沟渠净化能力增强,各沟渠

表1 不同生态沟渠内水体理化性质差异

Table 1 Differences of physicochemical properties of water in different drainage ditches

处理	pH		DO/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		EC/($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	
	进水区	出水区	进水区	出水区	进水区	出水区
ZVDD-L	7.66±0.23a	7.93±0.28a	5.31±0.57a	5.58±1.14a	559±114a	532±99a
ZVDD-M	7.65±0.20a	8.13±0.37ab	5.21±0.51a	6.54±1.29ab	565±118a	540±92a
ZVDD-H	7.65±0.23a	8.05±0.45ab	5.34±0.87a	5.97±1.19ab	568±123a	541±100a
VDD-L	7.64±0.39a	8.52±0.40b	5.48±0.89a	7.32±0.70b	550±109a	508±97a
VDD-M	7.74±0.30a	8.46±0.50b	5.44±1.17a	7.19±0.93b	559±117a	501±108a
VDD-H	7.69±0.33a	8.04±0.49ab	5.28±0.80a	6.25±1.30ab	562±117a	531±102a

注:不同小写字母表示不同沟渠处理间存在显著差异($P < 0.05$)。

Note: different letters indicate significant differences among the vegetated drainage ditches ($P < 0.05$).

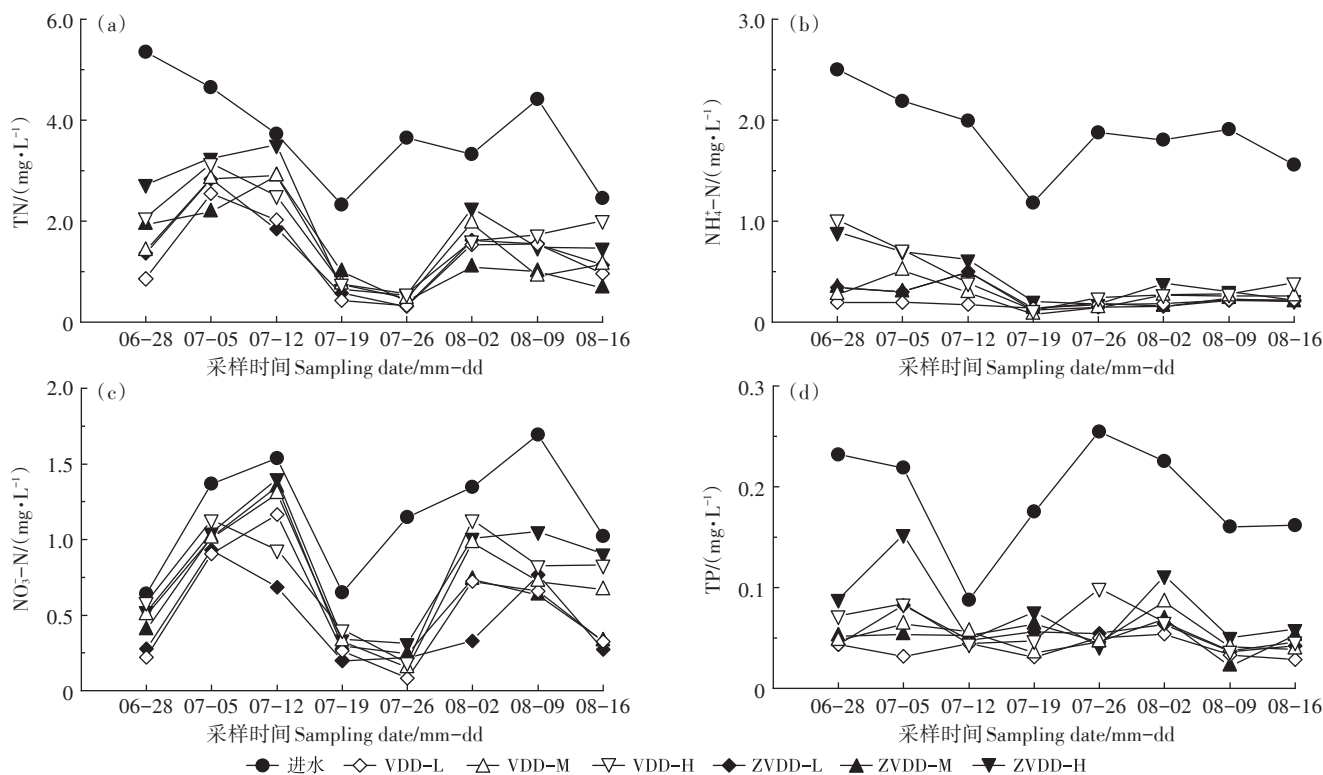
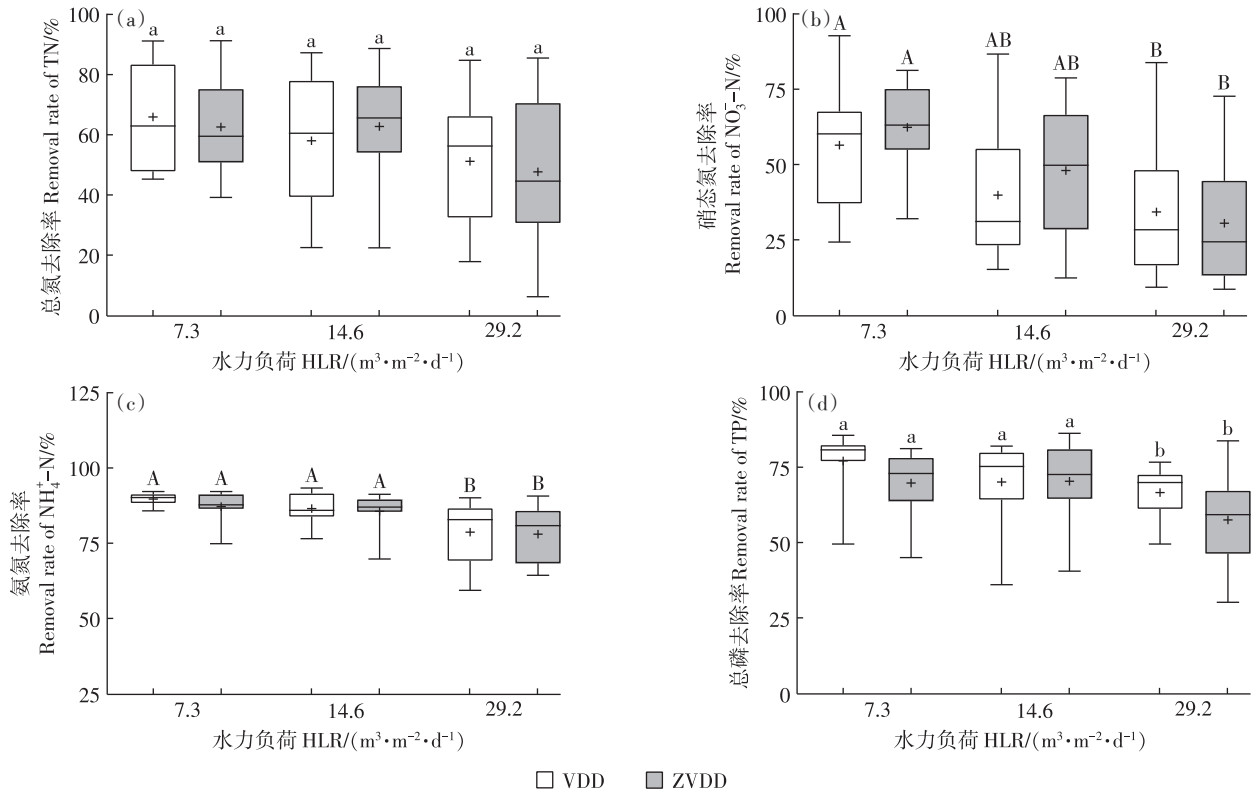


图2 不同沟渠进、出水氮、磷浓度变化

Figure 2 Nitrogen and phosphorus concentration changes of influent and effluent in different drainage ditches

出水TN浓度基本低于 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,低HLR下VDD和ZVDD甚至低至 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。另外,不同沟渠出水平均TN浓度呈现较大差异,总体表现为 $\text{ZVDD-H} > \text{VDD-H} > \text{VDD-M} > \text{ZVDD-M} > \text{ZVDD-L} > \text{VDD-L}$,即出水中TN含量随HLR升高而增加。相应地,各沟渠平均TN浓度去除率为 $47.7\% \sim 66.0\%$,随HLR升高而降低(图3)。双因素方差分析结果表明,沟渠类型和HLR及其交互作用对TN去除率均无显著影响(表2)。除实验早期高水力负荷下沟渠出水氨氮浓度约为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外,各沟渠出水中氨氮浓度多为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,优于地表水Ⅱ类标准,各沟渠出水中氨氮平均浓度总体表现为 $\text{ZVDD-H} > \text{VDD-H} > \text{ZVDD-M} > \text{VDD-M} > \text{ZVDD-L} > \text{VDD-L}$,随HLR降低而降低;各沟渠对氨氮的平均去除率为 $78.0\% \sim 89.7\%$,表明苦草沟渠可以有效去除水体氨氮。双因素方差分析结果表明,HLR显著影响沟渠对氨氮的净化效果,其中高HLR下沟渠对氨氮净化效率显著低于中和低HLR下($P < 0.05$)。各沟渠出水中硝态氮浓度总体变化范围为 $0.08 \sim 1.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均硝态氮浓度为 $0.46 \sim 0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总体表现为 $\text{ZVDD-H} > \text{VDD-H} > \text{ZVDD-M} > \text{VDD-M} > \text{VDD-L} > \text{ZVDD-L}$,各沟渠对硝态氮的去除率为 $30.6\% \sim 62.3\%$,高HLR下硝态氮去除率

显著小于低HLR下($P < 0.05$)。苦草沟渠对氨氮的去除率高于硝态氮,一方面沉水植物苦草会优先吸收利用氨氮^[7],另一方面植物光合产氧可能促进氨氮通过硝化作用转化为硝态氮^[18],另外在 $\text{pH} > 8.0$ 的情况下少量氨氮可通过氨挥发去除^[19];硝态氮则主要通过微生物的反硝化作用转化为 N_2O 或 N_2 得以从水体中彻底去除,这一过程多受水体DO以及碳源供应等影响,尤其是农田径流中往往由于低碳氮比限制了反硝化作用^[7,20],这也很好地解释了进水以氨氮为主,而沟渠出水硝态氮含量更高。在各采样时间沟渠出水TP浓度多低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水平均TP浓度为 $0.04 \sim 0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可达地表水Ⅱ类标准,总体表现为 $\text{ZVDD-H} > \text{VDD-H} > \text{ZVDD-L} > \text{VDD-M} > \text{ZVDD-M} > \text{VDD-L}$,各沟渠TP浓度去除率为 $57.5\% \sim 77.1\%$ (图3d),这与张树楠等^[3]报道的结果接近;TP浓度去除率随HLR升高而降低,并在高和低HLR间存在显著差异($P < 0.05$)。总体而言,各沟渠对氮、磷的去除率主要受HLR影响,随HLR降低而升高,这与沟渠内氮、磷主要通过植物吸收、基质吸附、化学沉降以及微生物降解等作用得以去除有关^[4]。HLR低时,污水停留时间长,有助于各类生化反应的充分发生,促进氮、磷的有效去除。沸石填料添加对沟渠氮、磷净化效率没



图中标注不同小写字母表示不同水力负荷间存在显著差异($P<0.05$),不同大写字母表示存在极显著差异($P<0.01$)。下同。
Different lower-case letters indicate statistical significances among different hydraulic loading rates ($P<0.05$), and different upper case letters indicate extremely significant differences ($P<0.01$). The same below.

图3 不同沟渠氮、磷浓度去除率

Figure 3 Concentration removal rates of nitrogen and phosphorus in different drainage ditches

有显著影响,这可能是由于沸石在沟渠内放置时间较长,出现了吸附饱和,虽然其表面微生物仍能发挥作用,但对沟渠净化效率的提升有限^[7],因此应及时进行填料的更新或解吸以保障其作用的有效发挥。

图4为不同沟渠的单位面积氮、磷去除率。六条沟渠对TN、氨氮、硝态氮和TP的单位面积去除率分别为305.3~1 009.2、213.2~758.2、82.7~221.2 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和17.8~66.7 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,Chen等^[21]也报道了近似的去除效果。双因素方差分析(表2)结果表明,HLR显著影响单位面积TN($P<0.01$)、氨氮($P<0.01$)、硝态氮($P<0.05$)和TP($P<0.01$)去除率,而沟渠类型及其与HLR的交互作用对单位面积氮、磷去除率无显著影响($P>0.05$)。Tukey事后检验结果表明,高HLR下沟渠TN单位面积去除率显著高于中、低HLR下($P<0.05$),而中、低HLR下TN单位面积去除率无显著差异($P>0.05$);氨氮单位面积去除率随HLR升高显著升高,并在3个HLR梯度间均呈现极显著差异($P<0.01$),硝态氮单位面积去除率只在高和低HLR间表现出显著差异($P<0.05$)。TP单位面积去除率在3个HLR间均表现出显著差异($P<0.05$)。总体而言,与浓

度去除率相反,各沟渠对不同形态氮和磷的单位面积去除率随HLR升高而增加。Reedy等^[22]认为HLR升高为更多营养盐去除提供了可能,Chen等^[21]的研究也报道了同样的结果。目前对于生态沟渠出水氮、磷浓度还没有严格的标准,本研究的结果表明,在实验进水浓度下,出水氮、磷浓度基本可以达到低于地表水水质V类、甚至II类标准,并且中、高HLR下氮、磷浓度去除率也多无显著差异,因此,在实际运行中适当提高HLR可能有利于沟渠截留更多氮、磷污染物。

2.2 不同沟渠中苦草生长繁殖响应特征

2.2.1 不同沟渠内苦草生长繁殖特征

实验期间,沟渠内水温为28.1~31.3 $^{\circ}\text{C}$,比较适宜苦草的生长繁殖。图5为不同沟渠内苦草生长指标情况。与实验开始时相比,苦草的植株密度、叶片长度以及总生物量(干质量)分别增加5.9~7.0、1.8~2.3倍和4.0~5.0倍,表明在实验运行条件下苦草生长良好;并且低HLR下沟渠内苦草叶长、根长及总生物量(干质量)略高于高HLR。Pearson相关分析表明(表3),苦草植株密度与水体TN、氨氮和TP含量呈显著正相关($P<0.05$,双尾检测),沟渠水体高氮、磷含量可

表2 沟渠类型及HLR对沟渠净化效率影响的双因素方差分析
Table 2 Two-way ANOVA of the effect of drainage ditch type, HLR and their interaction on nitrogen and phosphorous removal efficiencies

处理	浓度去除率	F	P	通量去除率	F	P
沟渠类型	TN	0.011	0.915	TN	0.081	0.777
	NH ₄ ⁺ -N	0.288	0.595	NH ₄ ⁺ -N	0.038	0.847
	NO ₃ ⁻ -N	0.304	0.584	NO ₃ ⁻ -N	0.003	0.954
	TP	2.024	0.162	TP	0.529	0.471
HLR	TN	2.12	0.133	TN	13.646	0
	NH ₄ ⁺ -N	9.216	0.000	NH ₄ ⁺ -N	152.965	0
	NO ₃ ⁻ -N	6.239	0.004	NO ₃ ⁻ -N	4.726	0.014
	TP	3.172	0.052	TP	28.924	0
沟渠类型×HLR	TN	0.202	0.818	TN	0.189	0.829
	NH ₄ ⁺ -N	0.134	0.875	NH ₄ ⁺ -N	0.003	0.997
	NO ₃ ⁻ -N	0.336	0.716	NO ₃ ⁻ -N	0.354	0.704
	TP	0.570	0.570	TP	0.314	0.732

能促进了苦草的营养繁殖。周金波等^[23]研究发现,苦草对氨氮的最大适宜浓度为 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在此范围内苦草生物量随氨氮浓度升高而增加。也有研究表明,苦草在一级B标水体中,即TN浓度和TP浓度分别约为 $9.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,生物量大幅增加,并可

将水质净化达到V类^[24]。本实验中沟渠水体TN、氨氮及TP浓度均低于以上报道的数值范围,有利于苦草的生长繁殖,进而促进沟渠对氮、磷等污染物的去除。

2.2.2 不同沟渠内苦草氮、磷及叶绿素含量特征

图6为沟渠内苦草氮、磷含量情况。实验开始时,苦草叶片和根系TN含量分别为 $30.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $22.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;实验结束时,苦草叶片TN含量显著升高为 $32.3 \sim 41.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,根系TN含量为 $19.3 \sim 26.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,较实验开始时部分沟渠中苦草根系TN含量有小幅下降。苦草TN含量总体表现为叶片高于根系,这一结果与Wang等^[25]的报道一致。另外,进水区苦草的叶片和根系TN含量均高于出水区,其中ZVDD-H和VDD-M中叶片以及VDD-H中的TN含量在进水区显著高于出水区($P < 0.05$)。实验起始时,苦草叶片和根系TP含量分别为 $6.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $5.97 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;实验结束时,叶片和根系TP含量在各沟渠进水区总体表现为升高,但在出水区降至 $3.97 \sim 4.80 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。另外,与苦草TN含量变化趋势一致,进水区根叶TP含量均高于出水区,但是与TN不同的是,几乎所有6个沟渠内进水区和出水区苦草TP含量都表现出显著甚至极

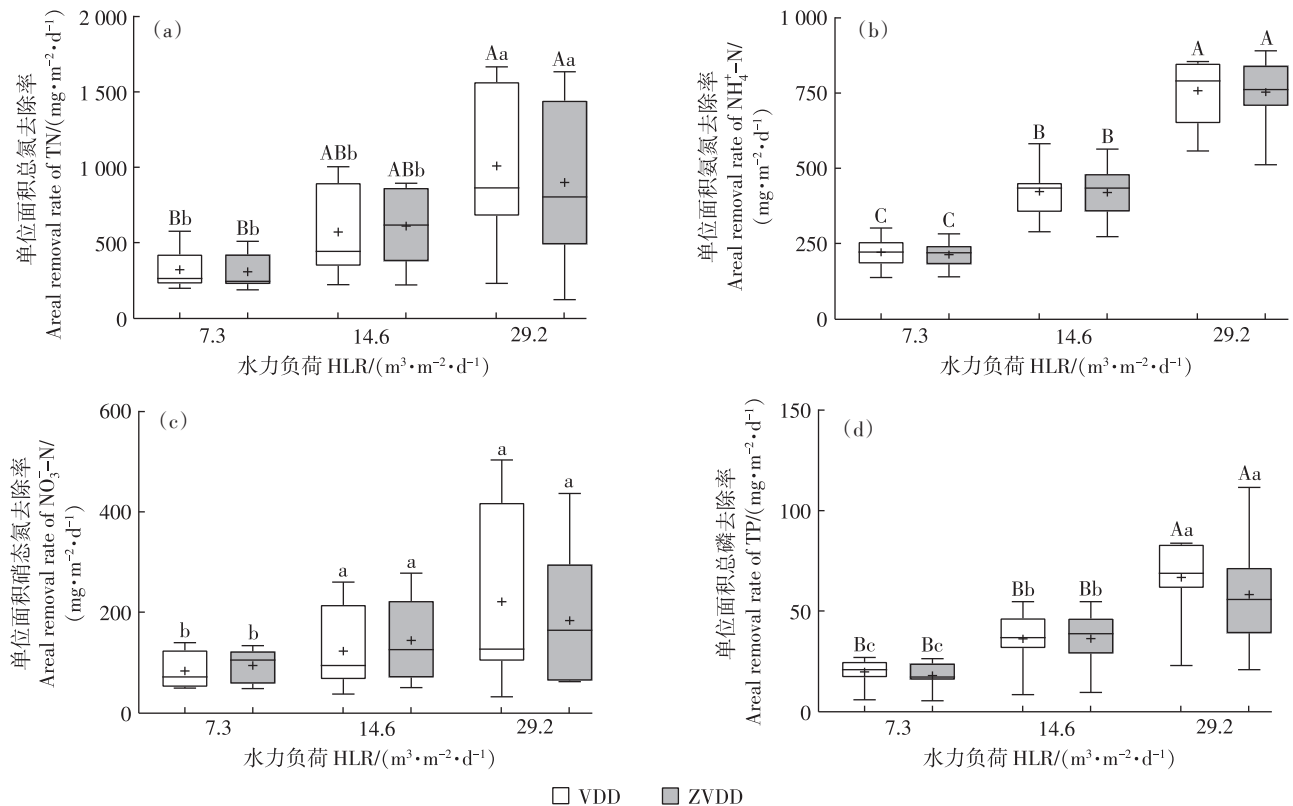


图4 不同沟渠单位面积氮、磷去除率

Figure 4 Areal removal rate of N and P in different drainage ditches

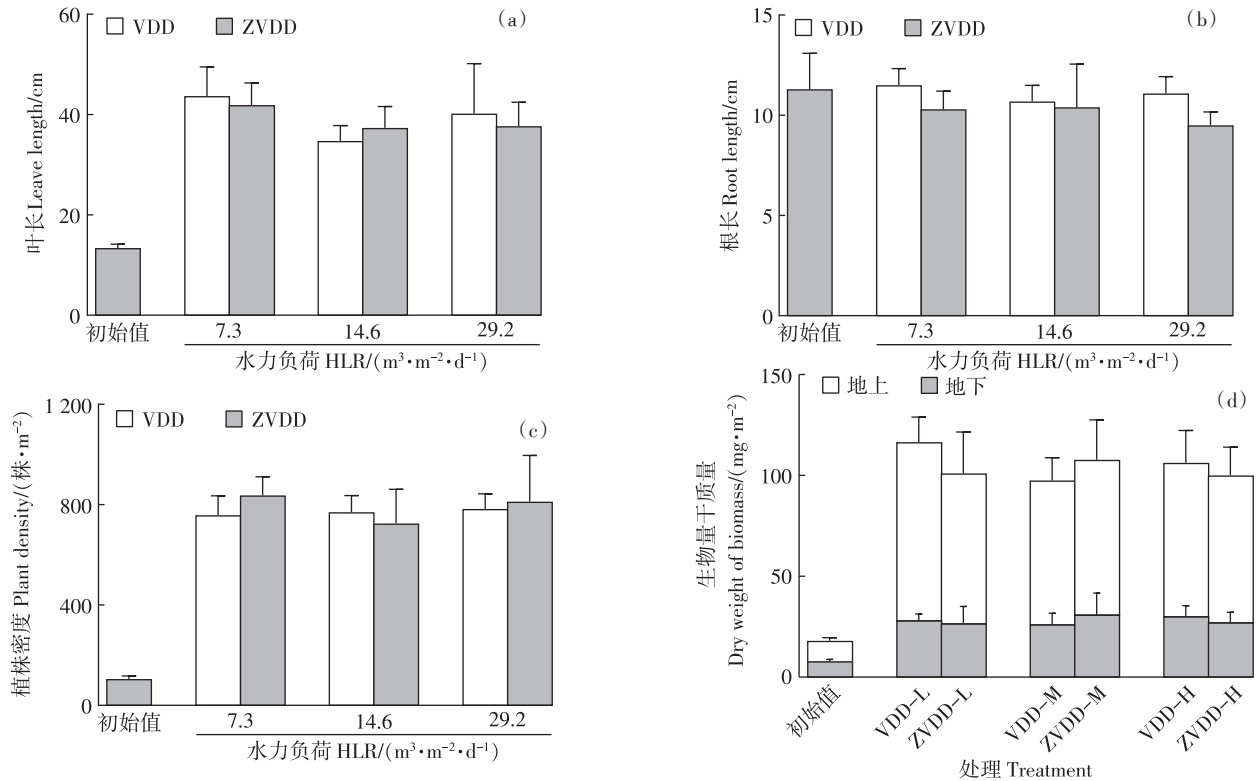


图5 不同沟渠内苦草生长指标

Figure 5 Growth characteristics of *V. natan* in different drainage ditches

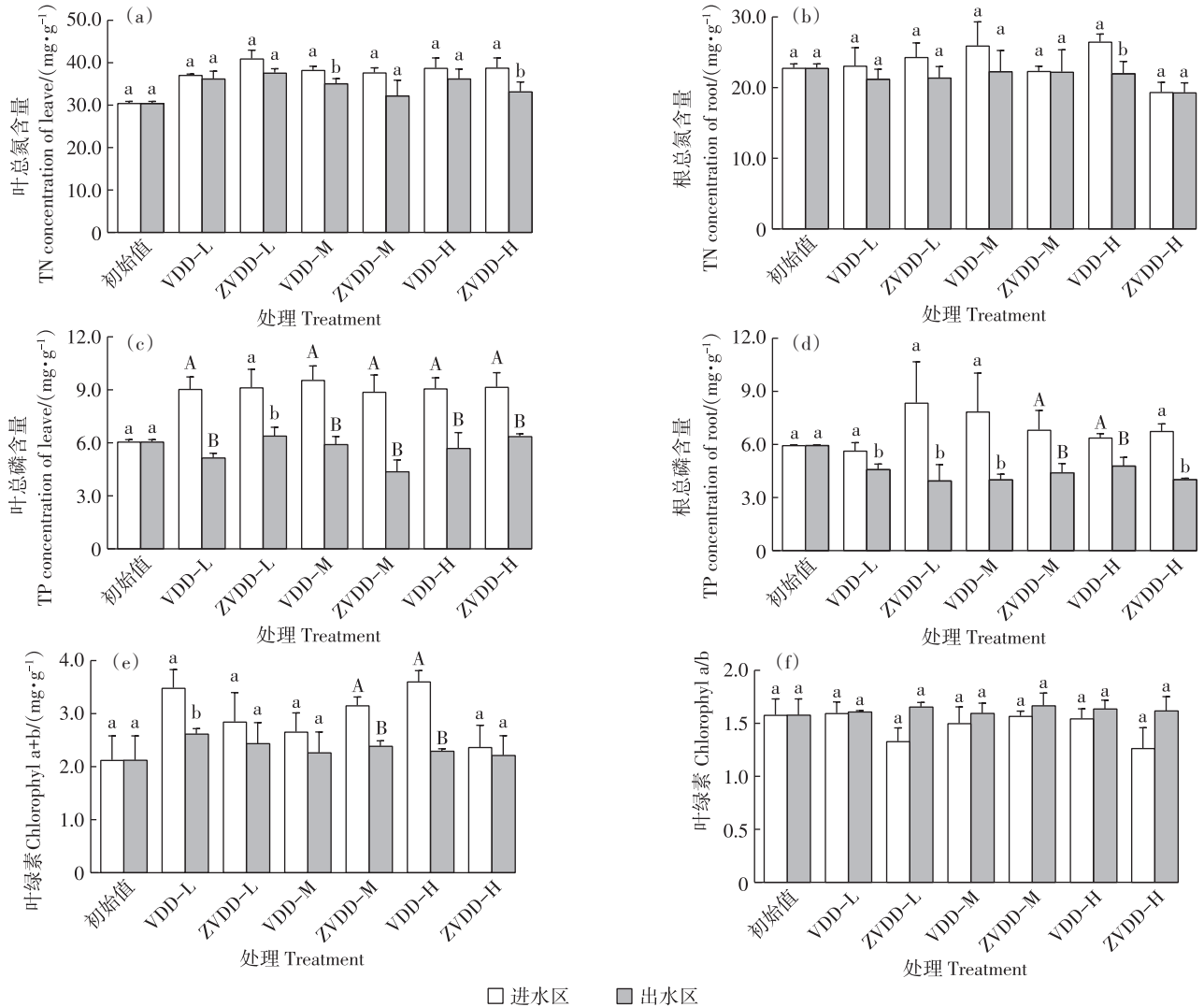
表3 苦草生长生理性状与沟渠水质 Pearson 相关性
Table 3 Pearson correlations between the growth and physiological indices of *V. natans* and water quality parameters in VDD

指标		TN	NH ₄ -N	NO ₃ -N	TP
生长指标	叶长	-0.308	-0.259	-0.217	-0.318
	根长	-0.320	-0.243	0.235	0.172
	密度	0.598*	0.745**	0.096	0.627*
	地上生物量	0.037	0.183	0.304	0.275
	地下生物量	0.018	0.174	0.241	0.238
	总生物量	0.035	0.196	0.313	0.288
氮、磷含量	TN 叶片	0.563	0.734**	0.177	0.664*
	根系	0.300	0.389	0.364	0.431
	TP 叶片	0.860**	0.901**	0.431	0.930**
	根系	0.732**	0.815**	0.236	0.850**
氮、磷储量	TN 叶片	0.203	0.349	0.305	0.405
	根系	0.144	0.337	0.454	0.416
	总储量	0.201	0.360	0.343	0.422
	TP 叶片	0.681*	0.768**	0.475	0.833**
	根系	0.623*	0.786**	0.367	0.839**
	总储量	0.683*	0.786**	0.471	0.852**
Chl a/b		-0.718**	-0.731**	-0.827**	-0.620*
Chl a+b		0.340	0.483	0.724**	0.568

注 Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

显著差异。这可能是由于植物体内元素含量反映了周围环境中元素的浓度情况,而植物磷含量相较于氮对周围环境中氮、磷的供应更敏感^[26-27]。这一结果也与沟渠内氮、磷浓度从进水区至出水区逐渐降低相一致,进水区较高的水体氮、磷含量保障了更充分的氮、磷供应量。Pearson 相关分析结果也表明,苦草叶片 TN 含量主要与沟渠水体中氨氮和 TP 呈显著正相关 ($P < 0.05$),这可能与沟渠内氮以氨氮为主要成分,并且苦草等沉水植物通常优先吸收利用氨氮相关^[7,17]。苦草叶片和根系 TP 含量则与水体 TN、氨氮和 TP 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$) (表 2),这与 Garbey 等^[28]报道的结果相一致,即沉水植物磷含量通常随水体养分升高而增加。相应地,苦草地上、地下及总磷储量也与水体 TN、氨氮和 TP 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),表明水体高氮、磷含量促进了苦草对水体中磷的吸收同化,从而将磷从水体彻底去除。

光合作用是植物对环境变化最为敏感的生理过程之一,叶片叶绿素含量是衡量光合作用强弱的重要因素,并与环境氮、磷供应密切相关。图 6(e)表明,与实验前相比,运行结束时各沟渠内苦草叶绿素含量呈升高趋势,为 2.22~3.60 mg·g⁻¹,表明沟渠氮、磷营养盐输入促进了苦草叶绿素的合成。另外,苦草叶片



图中不同小写字母表示同一沟渠内苦草在进水区和出水区间存在显著差异 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示存在极显著差异 ($P < 0.01$)
 Different lowercase letters indicate significant differences between the influent area and effluent area in the same ditch ($P < 0.05$), and different uppercase letters indicate extremely significant differences ($P < 0.01$)

图6 不同沟渠中苦草氮、磷及叶绿素含量

Figure 6 Concentration of nitrogen, phosphorus, and chlorophyll of *V. nantan* in different VDDs

叶绿素含量总体表现为进水区高于出水区, 并与硝态氮含量极显著正相关 ($P < 0.01$), 表明氮营养盐是影响植物叶绿素的重要因素^[29]。实验前, 苦草叶片叶绿素 a/b 为 1.58, 实验结束时进水区苦草叶片叶绿素 a/b 值多表现为小幅降低, 而出水区则小幅增加, 并且叶绿素 a/b 与水体 TN、氨氮、硝态氮含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)、和 TP 含量呈显著负相关 ($P < 0.05$), 可能是由于在相对较高氮、磷含量环境下, 苦草通过增加叶绿素 b 的含量调整对光线的适应能力^[30]。

2.3 苦草氮、磷吸收对生态沟渠净化效率的贡献

植物吸收是沉水植物水质净化的主要途径之一。但是关于植物直接吸收对沟渠、湿地等系统脱氮除磷

的贡献一直存在争议。由表 4 可知, 六条沟渠内苦草吸收除氮量为 $2\ 674.4 \sim 3\ 384.1\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 低于沉水植物穗状狐尾藻 (*Myriophyllum aquaticum*) 的 $4.0 \sim 222\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[18], 以及植物沟渠中的挺水植物水甜茅 (*Glyceria maxima*) 的 $17.8 \sim 86.2\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、芦苇 (*Phragmites australis*) 的 $50.5 \sim 81.8\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 以及香蒲的 (*Typha latifolia*) 的 $66.3 \sim 86.2\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; 沟渠内苦草直接吸收去除磷量为 $579.6 \sim 673.9\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 这一值也远低于挺水植物的 $8.52 \sim 81.8\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[31]。造成这一差异的原因, 一方面可能是由于苦草生物量远低于上述报道中的挺水或沉水植物; 其次是不同报道沟渠中氮、磷浓度差异、运行方式、季节等也会影响植物吸收氮、磷量^[5]。苦草吸收

表4 不同沟渠氮、磷去除量及植物吸收

Table 4 Nitrogen and phosphorus content by plant assimilation and its contribution to N and P removal in different VDDs

处理	沟渠脱氮量/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)	苦草吸收除氮量/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)				沟渠除磷量/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)	苦草吸收除磷量/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)			
		地上	地下	总值	贡献率/%		地上	地下	总值	贡献率/%
ZVDD-L	16 181.6	2 586.9	423.7	3 010.6	18.6	943.3	496.1	117.4	613.5	65.0
ZVDD-M	32 264.2	2 431.6	524.8	2 956.4	9.2	1 915.8	493.6	133.3	626.9	32.7
ZVDD-H	47 637.9	2 331.4	343.1	2 674.4	5.6	3 078.3	517.1	100.9	618.0	20.1
VDD-L	16 965.8	2 939.6	444.5	3 384.1	19.9	1 039.5	577.6	96.3	673.9	64.8
VDD-M	30 192.3	2 299.1	434.6	2 733.7	9.1	1 909.4	482.8	96.8	579.6	30.4
VDD-H	53 485.9	2 542.4	553.2	3 095.6	5.8	3 534.4	514.6	123.7	638.3	18.1

氮、磷主要储存于地上部分,分别占82.1%~87.2%和78.7%~85.7%,这是由于沟渠内苦草地上生物量及氮、磷含量均高于地下部分(图5,图6)。不同沟渠间,VDD-L中苦草吸收氮、磷量最大,可能是低HLR下增加了水力停留时间,促进苦草吸收氮、磷。苦草直接吸收对沟渠氮和磷去除的贡献分别为5.6%~19.9%和18.1%~65.0%,其中对脱氮的贡献与金树权等^[32]报道的1.5%~13.3%接近,而对沟渠除磷的贡献则高于报道的2.2%~13.2%。另外,苦草吸收对沟渠氮、磷去除的贡献随HLR升高显著降低,这主要是由于随HLR升高各沟渠去除氮、磷量显著升高(图4),导致苦草直接吸收对脱氮的贡献降低。因此,植物吸收对沟渠脱氮除磷的贡献一方面因物种、运行条件、季节等因素而异,另一方面需综合考虑HLR等运行参数差异。另外,研究也发现随着沟渠水体氮、磷含量从进水区至出水区递减,进、出水区苦草生物量,氮、磷含量等显著降低,因此在评估沟渠这类线型湿地内植物吸收氮、磷的贡献时,应根据流程氮、磷等含量变化合理设置植物样品采集样点,以提高评估植物吸收作用的准确性。

3 结论

(1)苦草沟渠和沸石+苦草沟渠中总氮、总磷的去除率分别可达47.7%~66.0%、57.5%~77.1%,总氮、总磷的单位面积去除率分别为305.3~1 009.2、17.8~66.7 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;浓度去除率随水力负荷(HLR)升高而降低,单位面积去除率则随HLR升高而升高;HLR是影响生态沟渠氮、磷去除效果的主要因素,其中对总氮和总磷单位面积去除率的影响更为显著。

(2)低HLR下沟渠内苦草生长更好,苦草叶片及根系氮、磷和叶绿素含量在进出水区差异显著,并与沟渠水体氮、磷含量显著相关。

(3)苦草直接吸收对沟渠氮、磷去除量的贡献分

别为5.6%~19.9%、20.1%~65.0%,并且随HLR升高而降低,HLR是影响苦草直接吸收对沟渠氮、磷去除贡献的主要因素。

(4)虽然提高HLR会降低生态沟渠对农田尾水中氮、磷的浓度去除率,但可以显著增加氮、磷的截留量。因此,根据区域农田面源污染现状和控制要求,采用浓度和通量相结合对生态沟渠净化效率进行综合评价,优化生态沟渠设计与运行管理,有助于提高农田面源污染治理效果。另外,还应加强水力负荷等因素影响下外加填料净化机理的研究,及时更新或替换填料以保障其强化净化功能的发挥。

参考文献:

- [1] HOWARTH R, CHAN F, CONLEY D J, et al. Coupled biogeochemical cycles: eutrophication and hypoxia in temperate estuaries and coastal marine ecosystems[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(1):18-26.
- [2] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1):96-101. YANG L Z, FENG Y F, SHI W M, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1):96-101.
- [3] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. *环境科学*, 2015, 36(12):4516-4522. ZHANG S N, XIAO R L, LIU F, et al. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12):4516-4522.
- [4] KUMWIMBA M N, MENG F G, ISEYEMI O, et al. Removal of non-point source pollutants from domestic sewage and agricultural runoff by vegetated drainage ditches (VDDs): design, mechanism, management strategies, and future directions[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639:742-759.
- [5] TAYLOR J M, MOORE M T, SCOTT J T. Contrasting nutrient mitigation and denitrification potential of agricultural drainage environments with different emergent aquatic macrophytes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(4):1304-1314.
- [6] KRÖGER R, MOORE M T, LOCKE M A, et al. Evaluating the influence of wetland vegetation on chemical residence time in Mississippi

- Delta drainage ditches[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7):1175-1179.
- [7] CUI N X, ZHANG X, CAI M, et al. Roles of vegetation in nutrient removal and structuring microbial communities in different types of agricultural drainage ditches for treating farmland runoff[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 155:105941.
- [8] GAO H L, QIAN Y S, XIN Q. A multi-species modelling approach to select appropriate submerged macrophyte species for ecological restoration in Gonghu Bay, Lake Taihu, China[J]. *Ecological Modelling*, 2017, 360:179-188.
- [9] 洪瑜, 田旭东, 王英, 等. 不同基质材料对稻田退水中氮磷的去除效果研究[J]. 宁夏农林科技, 2019, 60(4):4-5. HONG Y, TIAN X D, WANG Y, et al. Removal effect of nitrogen and phosphorus in return flow of rice paddy by different substrates[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2019, 60(4):4-5.
- [10] 刘福兴, 王俊力, 付子轼. 不同规格生态沟渠对排水污染物处理能力研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(3):561-570. LIU F X, WANG J L, FU Z S. Comparative research on effects of ecological ditches different in specification treating pollutants in drainage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3):561-570.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999:314-315. LU R K. Analysis methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1999:314-315.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000, 134-261. LI H S. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000:134-261.
- [13] 李飞, 杨旭斌, 林泽铭. 生态沟渠水质净化能力评估中浓度测定与通量测定方法的比较[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(11):2716-2718. LI F, YANG X B, LIN Z M. Comparison of the methods of concentration measurement and flux measurement in evaluation of water purification capacity of ecological ditches[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022, 63(11):2716-2718.
- [14] LIU J Z, LIU W, WANG F W, et al. Redox zones stratification and the microbial community characteristics in a periphyton bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 204:114-121.
- [15] YAN L Y, ZHANG S H, LIN D, et al. Nitrogen loading affects microbes, nitrifiers and denitrifiers attached to submerged macrophyte in constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622/623:121-126.
- [16] KUMWIMBA M N, ZHU B, MUYEMBE D K. Assessing the influence of different plant species in drainage ditches on mitigation of non-point source pollutants (N, P, and sediments) in the purple Sichuan Basin[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(6):267.
- [17] LI W, ZHANG Z, JEPPESEN E. The response of *Vallisneria spirulosa* (Hydrocharitaceae) to different loadings of ammonia and nitrate at moderate phosphorus concentration: a mesocosm approach[J]. *Freshwater Biology*, 2008, 53(11):2321-2330.
- [18] ZHANG S N, LIU F, HUANG Z R, et al. Are vegetated drainage ditches effective for nitrogen removal under cold temperatures? [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301:122744.
- [19] VYMAZAL J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/2/3):48-65.
- [20] 蔡敏, 崔娜欣, 张旭, 等. 稻秸秆添加强化沉水植物湿地对农田径流中不同形态氮的去除效果[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5):1829-1838. CAI M, CUI N X, ZHANG X, et al. Removal efficiency of different forms of nitrogen from farmland runoff by adding rice straw in submerged plant wetland[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(5):1829-1838.
- [21] CHEN L, LIU F, WANG Y, et al. Nitrogen removal in an ecological ditch receiving agricultural drainage in subtropical central China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82:487-492.
- [22] REEDY K R, KADLEC RH, FLAIG E, et al. Phosphorus retention in streams and wetland: a review[J]. *Critical Reviews Environmental Control*, 1999, 29(1):83-146.
- [23] 周金波, 金树权, 包薇红, 等. 不同浓度氨氮对4种沉水植物的生长影响比较研究[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1):74-81. ZHOU J B, JIN S Q, BAO W H, et al. Comparison of effects of ammonia-nitrogen concentrations on growth of four kinds of submerged macrophytes[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1):74-81.
- [24] 代蕾. 沉水植物对不同水质的净化作用及相关机理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018:36-42. DAI L. Purification and related mechanism of submerged macrophytes on different water quality[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018:36-42.
- [25] WANG J L, CHEN G F, ZOU G Y, et al. Comparative on plant stoichiometry response to agricultural non-point source pollution in different types of ecological ditches[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(1):647-658.
- [26] STERNER R W, ELSER J J. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere[M]. New Jersey: Princeton University Press, 2002:1183.
- [27] LI W, ZHONG J Y, YUAN G X, et al. Stoichiometric characteristics of four submersed macrophytes in three plateau lakes with contrasting trophic statuses[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 99:265-270.
- [28] GARBAY C, MURPHY K J, THIÉBAUT G, et al. Variation in P-content in aquatic plant tissues offers an efficient tool for determining plant growth strategies along a resource gradient[J]. *Freshwater Biology*, 2004, 49(3):346-356.
- [29] 高敏, 胡维平, 邓建才, 等. 太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应[J]. 环境科学, 2016, 37(12):4570-4576. GAO M, HU W P, DENG J C, et al. Responses of physiological indices of typical submerged macrophytes to water quality in Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12):4570-4576.
- [30] KOURIL R, PETR L, NAUS J, et al. On the limits of applicability of spectrophotometric and spectrofluorimetric methods for the determination of chlorophyll a/b ratio[J]. *Photosynthesis Research*, 1999, 62(1):107-116.
- [31] VYMAZAL J, BŘEZINOVÁ T D. Removal of nutrients, organics and suspended solids in vegetated agricultural drainage ditch[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 118:97-103.
- [32] 金树权, 周金波, 包薇红, 等. 5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. 环境科学, 2017, 38(1):156-161. JIN S Q, ZHOU J B, BAO W H, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of five submerged macrophytes[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(1):156-161.

(责任编辑:叶飞)